

На правах рукописи



Гурова Елена Игоревна

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ СВОЙСТВ
ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МАСЕЛ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ
В АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКЕ

2.6.12. Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»

Научный руководитель: Доктор технических наук, доцент
Маньшев Дмитрий Альевич

Официальные оппоненты: **Меджибовский Александр Самойлович**,
доктор технических наук, профессор, общество с
ограниченной ответственностью «Научно-
производственное предприятие Квалитет»
директор по развитию
Бартко Руслан Владимирович,
кандидат технических наук, акционерное общество
«Всероссийский научно-исследовательский
институт по переработке нефти», начальник отдела
смазочных материалов

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Ордена Трудового Красного
Знамени **Институт нефтехимического синтеза
им. А.В. Топчиева**

Защита состоится 06 июня 2024 года в 16.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.383.05 созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)» по адресу: 190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 24-26/49 литера А, Белоколонный зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), <https://technolog.edu.ru/filecat/486>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим отправлять по адресу: 190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 24-26/49 литера А, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Ученый совет, e-mail: dissowet@technolog.edu.ru

Автореферат разослан _____ апреля 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Клементьев Василий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

К маслам, применяемым в гидравлических системах (далее – ГС) авиационной техники (далее – АТ) предъявляют особые требования по стабильности эксплуатационных свойств (далее – ЭС). В результате развития АТ меняются условия эксплуатации ГС: уменьшается масса элементов гидросистем за счет способности гидравлического масла (далее – ГМ) отводить тепло, выделяемое в результате потерь энергии. Для улучшения динамических характеристик систем управления, уменьшения их габаритных размеров гидравлические насосы форсируют по давлению: в настоящее время используют ГС и насосы с рабочим давлением от 35 МПа до 60 МПа и выше. Увеличиваются скорости полета летательных аппаратов, следовательно, возрастают рабочие температуры (до 150 °С).

Оценка уровня эксплуатационных и физико-химических свойств ГМ осуществляется лабораторными методами, которые проводятся в статических условиях и малоинформативны, так как не моделируют химмотологические процессы (далее – ХП), протекающие в ГС АТ. В Типовой программе квалификационных испытаний опытных образцов масла АМГ-10 представлен лишь один метод квалификационной оценки работоспособности масел в гидросистеме с аксиально-поршневым насосом, выполняемый в ОАО АК «Рубин». Методика предназначена для подтверждения работоспособности силовой установки – гидронасоса - в период установленного ресурса; проведение испытаний по данной методике длительное и дорогостоящее. При этом отсутствует метод прогнозирования стабильности свойств ГМ при его применении в гидросистеме, который позволил бы устанавливать срок применения масла в ГС АТ до его замены.

Для получения прогнозной оценки срока применения ГМ в ГС требуется установление количественных зависимостей показателей качества от его состава, параметров рабочего процесса, условий эксплуатации АТ, при этом испытания должны быть выполнены в модельных условиях, отражающих функциональное воздействие на масло при его эксплуатации в ГС АТ.

Актуальность более достоверной оценки сроков применения ГМ до замены в гидросистеме АТ подтверждается появлением новых ГМ на основе продуктов гидрокрекинга, содержащих в составе сложные эфиры и вязкостные полимерные присадки, об ЭС которых сложно судить, основываясь на существующие физико-химические методы исследования.

Степень разработанности темы исследования

Изучением физико-химических и эксплуатационных свойств занимались ученые-химмотологи Школьников В.М., Булатников В.В., Крылов В.Б. на базе Всероссийского научно-исследовательского института по переработке нефти (АО «ВНИИ НП»). Оценку стабильности свойств ГМ для АТ исследовали в ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России». Исследования по разработке квалификационных методов испытаний опытных марок горюче-смазочных материалов для их допуска к применению в вооружении и военной технике проводились Раскиным Ю.Е., Митягиным В.А.

В опытно-конструкторских бюро ОКБ им. А.С. Яковлева, ОКБ им. П.О. Сухого, ОКБ А.Н. Туполева, ОКБ им. С.В. Ильюшина определены требования по надежности и долговечности работы ГС самолетов.

Цель и задачи

Цель диссертационной работы – прогнозирование срока применения масла до замены в гидравлической системе авиационной техники на основе исследования закономерностей и зависимостей изменения механохимической и термоокислительной стабильности свойств масла от состава базовых масел, загущающих присадок и условий применения, устанавливаемых при моделировании химмотологических процессов.

Для достижения поставленной цели решены задачи исследования:

1. Обоснование условий подобия химмотологической системы «Гидравлическое масло – гидравлическая система – условия эксплуатации», конструктивных особенностей физической модели и режимов испытания для исследования стабильности свойств ГМ в АТ и разработка метода прогнозирования срока применения ГМ в ГС;
2. Исследование влияния базовых масел и модификаторов вязкости на стабильность свойств ГМ;
3. Исследование зависимостей и закономерностей изменения свойств ГМ при его применении в АТ и разработка математической модели прогнозирования срока смены ГМ;
4. Исследование механической деструкции модификаторов вязкости в составе масла при применении в ГС АТ и обоснование выбора загущающих присадок в составе ГМ;
5. Техничко-экономическая оценка результатов исследования стабильности свойств ГМ.

Научная новизна

1. Обоснованы условия подобия для моделирования ХП деградации свойств ГМ при его применении в ГС АТ;

2. Установлена корреляционная зависимость между временем работы масла в ГС и продолжительностью испытаний в гидравлическом стенде с коэффициентом корреляции более 0,9 и разработан метод прогнозирования срока применения ГМ до замены в ГС АТ;

3. Получены регрессионные зависимости показателей стабильности свойств ГМ (изменения кинематической вязкости при 50 °С, кислотного числа и перепада давлений на фильтрах в физической модели (далее – ф-модель) ГС АТ) от температуры, давления и продолжительности испытаний. Установлено, что кинематическая вязкость при 50 °С для ГМ, загущенного полиметакрилатной присадкой, является показателем качества, наиболее склонным к изменению при его применении в ГС АТ;

4. Предложен критерий стабильности загущающей присадки, представляющий математическую систему степени полидисперсности (PD), стремящейся к 1, и отношения разности средневязкостной (M_v) и средневесовой (M_w) молекулярных масс к средневязкостной (M_v) молекулярной массе, стремящейся к минимуму.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке прогнозных моделей изменения показателей механохимической и термоокислительной стабильности ГМ (кинематической вязкости при 50 °С и кислотного числа) от условий применения в ГС АТ, позволяющие повысить информативность и достоверность прогнозных сроков применения ГМ до замены в ГС АТ при ускоренных испытаниях по корреляционной зависимости между временем работы масла в ГС и продолжительностью испытаний на гидравлическом стенде, а также в обосновании требований к маслам и срокам их применения в ГС АТ до замены.

Практическая значимость работы

Разработан метод прогнозирования срока применения ГМ, загущенных полиметакрилатными присадками, до замены в ГС АТ, основанный на физическом моделировании, использование которого позволяет сократить время проведения испытаний до 50 % и снизить затраты до 20 %.

Установлены минимальные сроки применения масла АМГ-10 в ГС Ил-76 до его замены с различными полиметакрилатными присадками: с присадкой Максойл ВЗ-011 – 2210 ч, с IRGAFLO 6000 V – 1768 ч, с Viscoplex 7-610 – 1192 ч.

Предложен критерий в виде математической модели для выбора вязкостной присадки, позволяющий на основе физико-химических характеристик полимера определить наиболее устойчивый загуститель для ГМ.

Методология и методы исследования

Методология исследования основана на использовании методов теории подобия, физического и математического моделирования. Изучение физико-химических и ЭС ГМ проводилось лабораторными методами в объеме ГОСТ 6794, а также физическими методами исследования – ИК-спектроскопия, гель-проникающая хроматография, исследование термической стабильности.

Положения, выносимые на защиту

1. Прогнозные модели изменения кинематической вязкости при 50 °С и кислотного числа ГМ, загущенного полиметакрилатными присадками, при его применении в ГС АТ от температуры, давления и продолжительности испытаний в виде полиномов второй степени.

2. Метод прогнозирования срока применения ГМ, загущенных полиметакрилатными присадками, до замены в ГС АТ, сущность которого заключается в получении математической модели изменения кинематической вязкости при 50 °С и кислотного числа масла от продолжительности испытаний на стенде в режиме максимальной нагрузки ($P=21$ МПа, $T=120$ °С), определении предельного времени эксплуатации ГМ в ГС по установленной корреляционной зависимости между временем эксплуатации масла в ГС АТ (самолета Ил-76) и продолжительностью испытаний в ф-модели, при которой кинематическая вязкость масла при 50 °С достигает предельного значения, равного 7 мм²/с.

3. Критерий стабильности вязкости загущающей присадки, представляющий математическую систему степени полидисперсности (PD), стремящейся к 1, и отношения разности средневязкостной (M_v) и средневесовой (M_w) молекулярных масс к средневязкостной молекулярной массе (M_v), стремящейся к минимуму.

Степень достоверности результатов

Обоснованность результатов диссертационного исследования подтверждается теоретическими и методологическими положениями, применением методов теории подобия, планирования эксперимента, согласованностью научных утверждений с экспериментальными данными; внедрением основных результатов исследования в практическую деятельность научно-исследовательского института.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечена экспериментальными исследованиями, проведенными стандартизованными, квалификационными методами и результатами стендовых испытаний; корреляцией прогнозных оценок стабильности свойств ГМ, полученных при стендовых испытаниях и натурных условиях эксплуатации ГС самолета Ил-76.

Апробация результатов

Основные результаты работы докладывались на национальной научно-практической конференции с международным участием «Нефть и газ: технологии и инновации», г. Тюмень, Тюменский индустриальный университет, 19-20 ноября 2020 год, конкурс молодых специалистов «Инновационные подходы к химмотологическому обеспечению разработки и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники», г. Москва, ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России», 15 декабря 2020 год, научно-техническая конференция «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса», г. Москва, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 27 апреля 2021 год, III научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Энергетика. Технологии, аппараты и машин жизнеобеспечения», г. Анапа, Военный инновационный комплекс «ЭРА», 20 октября 2021 год, конференция молодых специалистов ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России», 17 декабря 2021 год.

Публикации

По материалам диссертации получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 10 научных статей, 4 из которых в журналах, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки РФ, тезисы 3 докладов в сборниках материалов научных конференций.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 130 источников, 4 приложений. Общий объем диссертационной работы включает 177 страниц машинописного текста, в том числе 39 рисунков и 47 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность и степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов и апробация результатов исследования.

В Главе 1 проведен анализ особенностей условий применения ГМ в АТ. Определены основные факторы, влияющие на протекание ХП деградации свойств ГМ в границах исследования ГС самолета Ил-76.

Проведен анализ номенклатуры, состава и технологии производства ГМ, применяемых в ГС АТ, эксплуатируемой в условиях температур от минус 60 до 125 °С и рабочим давлением до 21 МПа. Отечественным ГМ для таких ГС является масло АМГ-10 по ГОСТ 6794; приведены зарубежные аналоги данного ГМ. Представлены компоненты для разработки перспективных ГМ, позволяющие повышать уровень ЭС: вязкостно-температурные и низкотемпературные, устойчивость к механической деструкции.

Проанализированы существующие методы оценки ЭС ГМ для ГС АТ. Установлено, что существующие методы оценки качества ГМ имеют ряд недостатков, заключающихся в условиях проведения испытаний, в размере материальных затрат и продолжительности исследований; в программе квалификационной оценки масел отсутствуют методы прогнозирования срока применения ГМ до замены в ГС АТ.

В Главе 2 представлены объекты исследования и методы испытаний ГМ для оценки их стабильности.

Для исследования влияния основы и загущающей присадки на стабильность свойств ГМ в качестве объектов исследования выбраны основы различной химической природы - полиальфаолефиновое масло ПАО-2, изопарафиновые масла НВИ-2 и VHV-4, дибутилсебацат (далее – ДБС), диоктилтерефталат (далее – ДОТФ); загущающие присадки – полиметакрилатные присадки различной молекулярной массы Максойл ВЗ-011 и Viscoplex 7-610, винил-н-бутиловый полимер Синтолукс В-20.

Оценка механической стабильности и термоокислительной стабильности масла определена по показателям качества: кинематическая вязкость при 50 °С по ГОСТ 33 и кислотное число по ГОСТ 5985 соответственно. С целью идентификации химического состава ГМ выбраны физические методы исследования – гель-проникающая хроматография, ИК-спектроскопия и определение термической стабильности.

Для разработки метода прогнозирования срока применения ГМ, загущенных полиметакрилатными присадками, выбрано масло АМГ-10 по ГОСТ 6794-2017 трех отечественных производителей. Представлены компонентный состав масел и характеристика основных компонентов; приведены физико-химические показатели качества.

Для разработки метода прогнозирования срока применения ГМ в ГС АТ применен научно-методический подход системного анализа, основанный на физическом и математическом моделировании ХС «ГМ – ГС – условия эксплуатации», позволяющий исследовать ХП деградации свойств ГМ при их применении в гидросистеме.

На основе морфологического и функционального описания ХС «ГМ – ГС – условия эксплуатации» определены параметры, определяющие ХП деградации свойств ГМ:

$$R = \varphi (T, V, v, d, \rho, \Delta P, \tau, \nu) \quad (1)$$

где R – результат изменения ЭС ГМ; T – рабочая температура ГМ, °С; V – объем ГМ в системе, м³; v – скорость потока жидкости, м/с; d – диаметр трубопроводов ГС, м; ρ – плотность ГМ, кг/м³; ΔP – перепад давления в системе, МПа; τ – время работы ГС, ч; ν – кинематическая вязкость ГМ, мм²/с.

Методом анализа размерностей получены выражения, преобразуемые в гидродинамические критерии подобия процессов в ф-модели и ГС самолета: критерии Рейнольдса (Re), Струхаля (Sh) и Эйлера (Eu). Условием однозначности определено соответствие значений температуры, давления и вязкости масла в реальной ГС и в ф-модели. На основании данных о технических параметрах ГС самолета Ил-76, с помощью полученных критериев подобия установлены требования к ф-модели и условиям ее функционирования (Таблица 1).

Таблица 1 – Параметры работы гидравлической системы и ф-модели

Рабочий параметр	ГС самолета ИЛ-76	Ф-модель
Рабочая температура ГМ, T , °С	120	120
Объем ГМ в системе, V , м ³	0,200	0,016
Скорость потока жидкости, v , м/с	10,1	6,1
Диаметр трубопроводов, d , мм	6	10
Плотность ГМ при 20 °С, ρ , кг/м ³	850	850
Перепад давления в системе, P , МПа	42,8	15,4
Вязкость кинематическая ГМ, ν , мм ² /с	10,00	10,00
Время работы ГС, τ , ч	1170	27

В качестве ф-модели использован гидравлический стенд, позволяющий моделировать работу ГС путем непосредственного энергетического воздействия на ГМ при его подаче по элементам системы. Стенд состоит из силового электропривода с дистанционным управлением и регулированием, основного гидравлического экспериментального контура и пульта управления. Управление и контроль за работой стенда осуществляется с помощью программного блока управления.

По сравнительным результатам оценки кинематической вязкости при 50 °С в ГС Ил-76 и на стенде получены корреляционная зависимость между сроком применения масла в ГС и продолжительностью испытания на

гидравлическом стенде в режиме максимальной нагрузки, характерной для ГС Ил-76 ($T=120\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P=21\text{ МПа}$) (Рисунок 1).

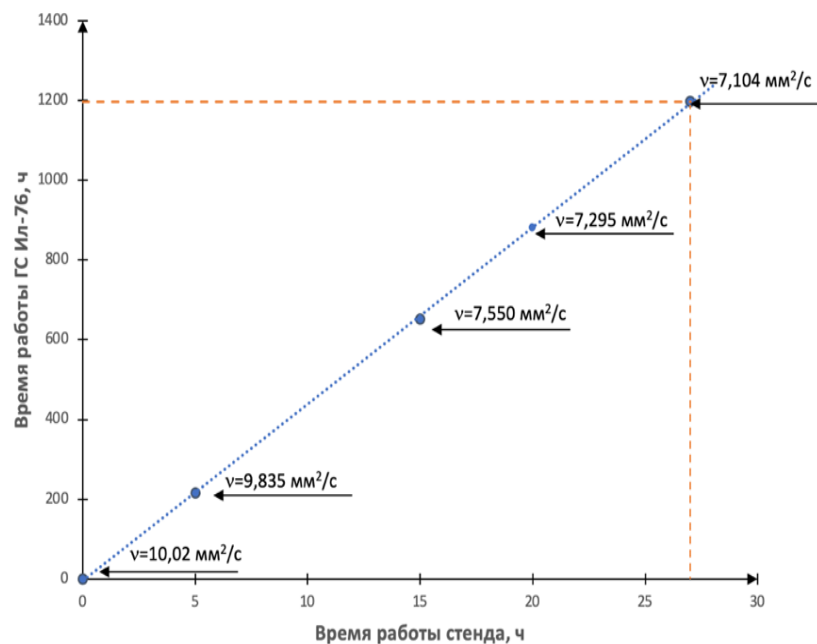


Рисунок 1 – Корреляционная зависимость между сроком эксплуатации масла в гидросистеме Ил-76 и продолжительностью испытания на стенде

С учетом установленной корреляционной зависимости (коэффициент корреляции более 0,9) между временем работы масла АМГ-10 в гидросистеме самолета Ил-76 и временем работы на стенде:

$$\tau_{\text{ГС}} = 44,316 \tau_{\text{ст}} - 4,717, \quad (2)$$

где $\tau_{\text{ГС}}$ – время работы масла АМГ-10 в гидросистеме самолета Ил-76;

$\tau_{\text{ст}}$ – время работы масла АМГ-10 на стенде,

получена прогнозная модель срока применения ГМ до замены в ГС самолета в виде математической системы:

$$\begin{cases} \tau_{\text{ГС}} = F(\tau_{\text{ст}}) \\ F(\tau_{\text{ст}}) = F_v(T, P, \tau) \end{cases} \quad (3)$$

На основе полученной прогнозной модели предложен метод прогнозирования срока применения ГМ до замены в ГС АТ, заключающийся в определении времени, при котором физико-химические показатели масла, характеризующие его термоокислительную и механохимическую стабильность, не превышают установленных предельных норм.

В Главе 3 представлены результаты исследования зависимостей и закономерностей изменения свойств ГМ при его применении в ГС АТ.

Результаты исследования влияния основ и загущающих присадок на стабильность свойств базовых масел, представляющих собой основу, загущенную 10 % вязкостной присадки, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты исследования физико-химических свойств основ с загущающими присадками

Образец	Вязкость кинематическая, ν , $\text{мм}^2/\text{с}$, при температуре		Плотность, ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$	Температура застывания, T , $^{\circ}\text{C}$	Стабильность вязкости к деструкции, %
	40 $^{\circ}\text{C}$	100 $^{\circ}\text{C}$			
ПАОМ-2 + Синтолюкс В-20	29,02	8,413	805,8	-55	22,0
ПАОМ-2 + Viscoplex 7-610	14,48	5,250	805,5	-64	23,6
ПАОМ-2 + Максойл ВЗ-011	15,08	4,955	804,4	-72	20,7
VHVI-2 + Синтолюкс В-20	44,78	11,20	829,9	-34	23,5
VHVI-2 + Viscoplex 7-610	26,22	11,45	826,4	-49	26,4
VHVI-2 + Максойл ВЗ-011	26,25	9,203	828,8	-49	23,7
VHVI-4 + Синтолюкс В-20	81,92	16,40	836,4	-18	22,4
VHVI-4 + Viscoplex 7-610	43,12	10,53	836,1	-44	22,4
VHVI-4 + Максойл ВЗ-011	47,28	10,47	836,8	-42	21,1
ДОТФ + Синтолюкс В-20	159,2	18,30	977,0	-33	35,8
ДОТФ + Viscoplex 7-610	91,57	15,00	975,9	-48	27,4
ДОТФ + Максойл ВЗ-011	88,86	13,96	976,7	-48	24,3
ДБС + Синтолюкс В-20	33,78	9,616	937,0	-71	27,8
ДБС + Viscoplex 7-610	17,72	6,094	937,2	-49	27,5
ДБС + Максойл ВЗ-011	16,05	5,397	937,8	-70	23,8

Установлено, что присадки Максойл ВЗ-011 и Viscoplex 7-610 обладают одинаковой загущающей способностью для выбранных основ; загущающая способность присадки Синтолюкс В-20 выше на 17 %. Полиметакрилатные присадки Viscoplex 7-610 и Максойл ВЗ-011 в смеси с различными основами проявляют депрессорные свойства: температура застывания смесей в 1,5-2 раза ниже по сравнению с чистыми основами; присадка Синтолюкс В-20 повышает температуру застывания ГМ.

Стабильность вязкости после озвучивания на установке УЗДН выше у образцов, загущенных присадкой Максойл ВЗ-011. Минимальное снижение вязкости наблюдается в образцах ПАОМ-2 + 10 % Максойл ВЗ-011 и масло изопарафиновое VHV-4 + 10 % Максойл ВЗ-011. В образцах с основой ДОТФ выявлен наибольший эффект деструкции.

Для исследования стабильности к механической деструкции загущающих полиметакрилатных присадок – отечественной Максойл ВЗ-011 и зарубежной Viscoplex 7-610 – в составе основ различной химической природы, проведена оценка стабильности вязкости после озвучивания на ультразвуковой установке УЗДН. Установлено, что на стабильность вязкости ГМ влияет природа полимерного загустителя: полиметакрилатная присадка Максойл ВЗ-011 устойчивее к механической деструкции на 7 % в составе обеих основ по сравнению с Viscoplex 7-610; основа масла не оказывает влияния на его стабильность вязкости ГМ.

Вязкостные полиметакрилатные присадки, применяемые в составе масла АМГ-10, исследованы физическими методами.

Установлено, что присадки Максойл ВЗ-011 и Viscoplex 7-610 имеют близкие значения показателей, присадка IRGAFLO 6000 V обладает максимальной термической стабильностью (Таблица 3).

Таблица 3 – Результаты оценки термической стабильности загущающих присадок

Наименование показателя	Наименование присадки		
	Viscoplex 7-610	Максойл ВЗ-011	IRGAFLO 6000 V
Температура начала реакции, °С	208,05	212,91	251,52
Температура 10 % потери массы, °С	152,44	207,36	236,81
Температура 50 % потери массы, °С	259,64	259,64	325,35
Температура первого максимума, °С	313,77	314,56	399,44
Температура окончания тепловых эффектов, °С	544,51	544,22	597,05

Исследованиями методом гель-проникающей хроматографии установлено, что присадка Максойл ВЗ-011 имеет более узкое молекулярно-массовое распределение, чем Viscoplex 7-610 и IRGAFLO 6000 V, следовательно, устойчивее к механической деструкции в составе масла АМГ-10 (Таблица 4).

Таблица 4 – Молекулярно-массовые характеристики загущающих присадок

Образец	Среднечисловая ММ, M_n , г/моль	Средневесовая ММ, M_w , г/моль	Средневязкостная ММ, M_v , г/моль	Степень полидисперсности, PD
Присадка Viscoplex 7-610	44613	140093	253382	3,14
Присадка IRGAFLO 6000 V	50767	154386	289420	3,04
Присадка Максойл B3-011	41088	101505	193437	2,47

Для исследования закономерностей изменения показателей качества ГМ при применении в ГС самолета установлены параметры ф-модели и условия проведения испытаний: объем масла в баке ($V_{ст}$) составляет 20 дм³; температура масла (Т) от 60 до 120 °С; рабочее давление (Р) от 16 до 21 МПа; время работы стендовой установки (τ) от 30 до 40 ч.

Для получения модели ХП с использованием стенда выбран 3-х факторный D-оптимальный план эксперимента Бокса-Бенкена. Значения факторов эксперимента на варьируемых уровнях приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Уровни варьирования и условия кодирования факторов

№ п/п	Факторы	Температура, T_u , °С	Давление, P_u , МПа	Время проведения испытания, τ_u , ч
1	Основной уровень «0»	90	18,5	35
2	Верхний уровень «+1»	120	21	40
3	Нижний уровень «-1»	60	16	30
4	Кодовые обозначения	X_1	X_2	X_3

Для получения полиномиальных уравнений регрессии второго порядка, отражающих зависимость показателей качества масла АМГ-10 (откликов) от факторов эксперимента, реализованы испытания в ф-модели. Для проб, отобранных из стенда с интервалом 5 часов, определены кинематическая вязкость при 50 °С и кислотное число. Полученные зависимости изменения кинематической вязкости при 50 °С масла АМГ-10 представлены на рисунке 2.

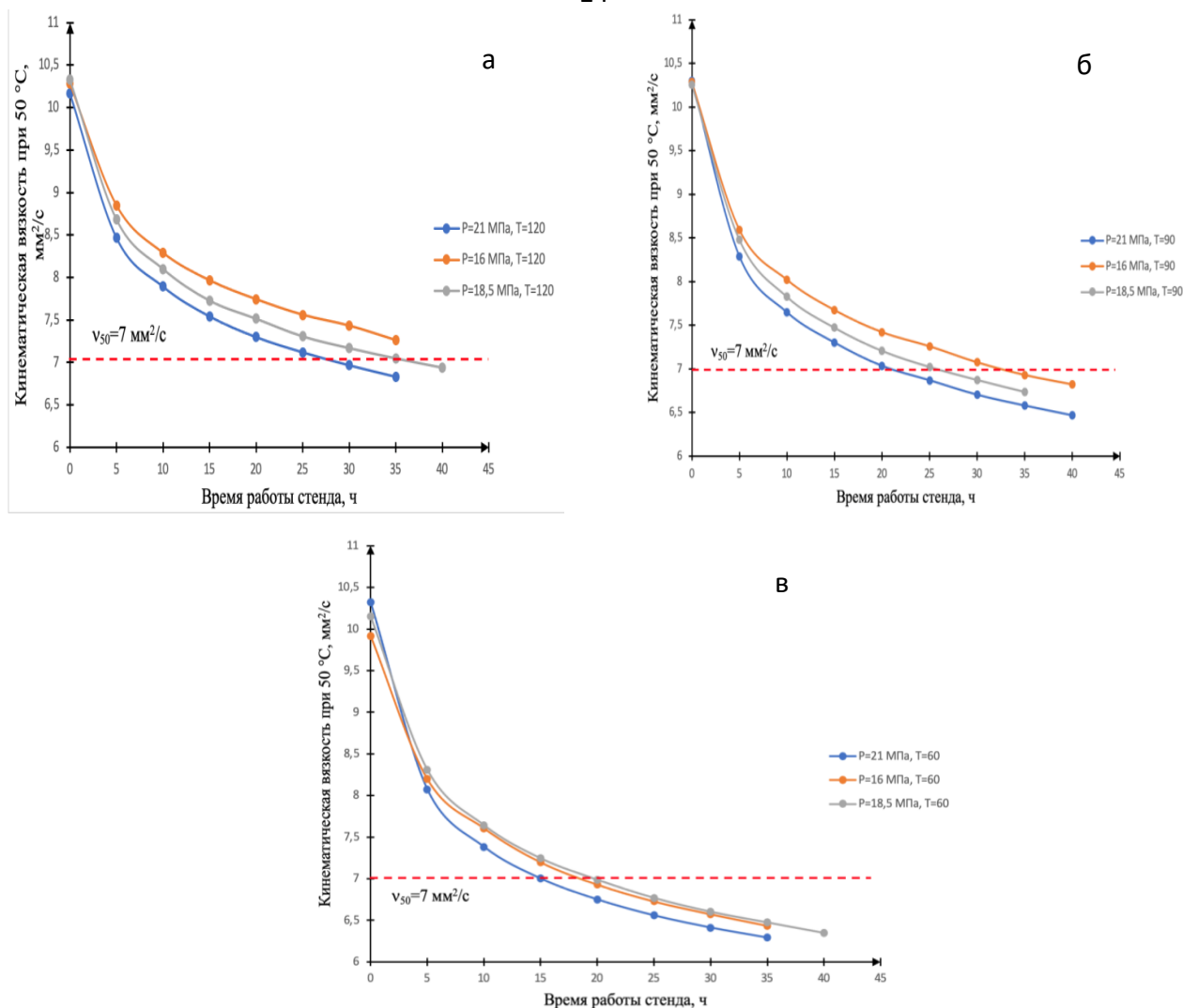


Рисунок 2 – Зависимости изменения кинематической вязкости при 50 °С масла АМГ-10 от времени работы стенда при разном давлении: $P=21$ МПа, $P=18,5$ МПа и $P=16$ МПа и температурах а) $T=120$ °С б) $T=90$ °С в) $T=60$ °С

Согласно эксплуатационной документации, масло АМГ-10 пригодно для работы в ГС самолета, если его кинематическая вязкость при 50 °С выше 7 $\text{мм}^2/\text{с}$ и кислотное число менее 0,15 мг КОН/г. При анализе результатов стендовых испытаний установлено, что определяющим показателем качества является кинематическая вязкость при 50 °С – в процессе эксплуатации ГМ в ф-модели вязкость уменьшилась ниже нормы.

Скорость снижения кинематической вязкости возрастает при постоянной температуре с ростом давления, а при постоянном давлении – с понижением температуры. При этом изменения кислотного числа испытуемого масла АМГ-10 находятся в пределах сходимости.

На основании полученных результатов испытаний, используя регрессионный анализ, получена математическая модель изменения качественного состояния ГМ АМГ-10 при его работе в гидросистеме.

По методике планирования эксперимента¹ получены числовые значения коэффициентов. Оценка значимости коэффициентов регрессии установлена с помощью t-критерия Стьюдента. В результате, незначимым коэффициентом для уравнения кинематической вязкости является коэффициент b_{23} , отражающий совместное влияние фактора x_2 (давление, P_u) и x_3 (τ_u), для кислотного числа – коэффициент b_{23} , отражающий совместное влияние фактора x_2 (P_u) и x_3 (τ_u).

Уравнение регрессии, отражающее зависимость изменения кинематической вязкости при 50 °С (Y_1) ГМ от факторов условий испытаний, имеет вид:

$$Y_1 = 6,7367 - 0,3150 \cdot X_1 - 0,1630 \cdot X_2 - 0,1218 \cdot X_3 - 0,0708 \cdot X_{12} + 0,0063 \cdot X_{13} - 0,0162 \cdot X_{11} - 0,0157 \cdot X_{22} + 0,0448 \cdot X_{33} \quad (4)$$

Зависимость изменения кислотного числа (Y_2) ГМ от факторов условий испытаний, имеет вид:

$$Y_2 = 0,0136 + 0,0020 \cdot X_1 + 0,0013 \cdot X_2 + 0,0018 \cdot X_3 - 0,0003 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,0008 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,0035 \cdot X_1^2 + 0,0003 \cdot X_2^2 + 0,0009 \cdot X_3^2 \quad (5)$$

Построены диаграммы поверхностей отклика, отражающие зависимость кинематической вязкости при 50 °С от двух переменных факторов при фиксированном третьем (факторы представлены в кодированном виде согласно плану Бокса-Бенкена) (Рисунок 3).

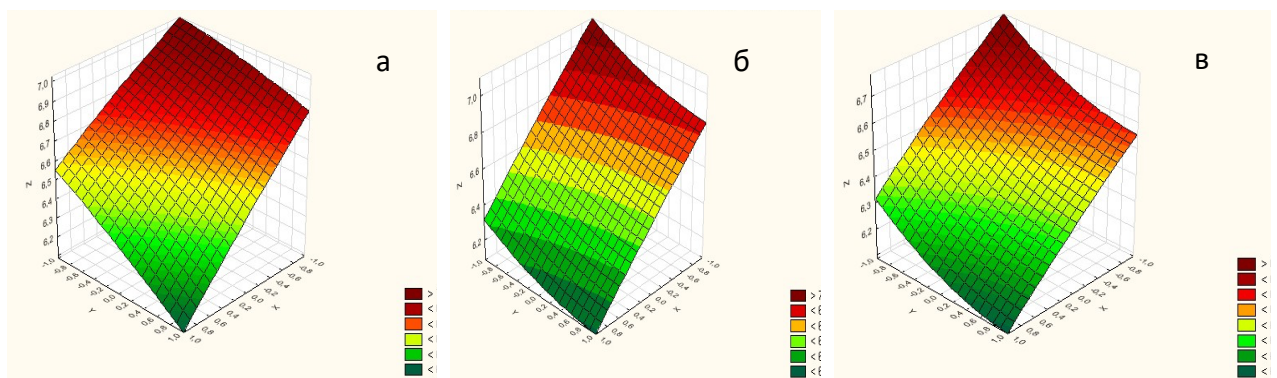


Рисунок 3 – Зависимости кинематической вязкости при 50 °С (Z) от:
 a – температуры T_u (X) и давления P_u (Y) при времени $\tau_u=40$ ч; $б$ –
 температуры T_u (X) и времени τ_u (Y) при давлении $P_u=21$ МПа; $в$ – давления
 P_u (X) и времени τ_u (Y) при температуре $T_u=120$ °С

¹ Box G.E.P., Behnken D.W. Some new three level designs for the study of quantitative variables. – Technometrics, 1960, v. 2, N4, h. 455-475)

Анализ полученных зависимостей показал, что температура оказывает наибольшее влияние на изменение вязкостных характеристик ГМ.

Получено уравнение регрессии для перепада давлений (Y_3) от факторов условий испытаний ГМ:

$$Y_3 = 1,3000 + 0,1275 \cdot X_1 + 0,2950 \cdot X_2 - 0,04503 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,1450 \cdot X_1^2 - 0,4950 \cdot X_2^2 \quad (6)$$

При оценке адекватности полученного уравнения регрессии критерий Фишера для уравнения регрессии кинематической вязкости масла АМГ-10 ($F_{\text{расч.}}$) имеет значение 1,38 и меньше значения для уравнения регрессии перепада давлений, равного 1,97, что свидетельствует о наибольшей предпочтительности прогнозирования стабильности свойств ГМ по изменению кинематической вязкости.

Образцы масла АМГ-10, отобранные со стенда с интервалом 5 ч при фиксированном давлении $P=21$ МПа и разной температуре ($T=60, 90$ и 120 °С), исследованы методом ИК-спектроскопии. В результате, значимых отличий в пределах точности метода ИК-спектроскопии не установлено.

Методом гель-проникающей хроматографии исследованы образцы масла АМГ-10 с вязкостными присадками Viscoplex 7-610 и Максойл ВЗ-011 различной вязкости после стендовых испытаний. Установлено, что при снижении кинематической вязкости масла молекулярные массы полимерного загустителя в образцах масла АМГ-10 уменьшаются (Таблица 6).

Таблица 6 – Молекулярные массы присадок Viscoplex 7-610 и Максойл ВЗ-011 в составе образцов масла АМГ-10 различной вязкости

Образец		Среднечисловая ММ, M_n , г/моль	Средневесовая ММ, M_w , г/моль	Средневязкостная ММ, M_v , г/моль	Степень полидис- персности, PD
Viscoplex 7-610	Масло АМГ-10 $\nu=10,30$ мм ² /с	67492	130444	207596	1,933
	Масло АМГ-10 $\nu=8,288$ мм ² /с	59335	89237	116094	1,504
	Масло АМГ-10 $\nu=6,465$ мм ² /с	43152	57825	71396	1,340
Максойл ВЗ-011	Масло АМГ-10 $\nu=10,11$ мм ² /с	49926	113115	220648	2,266
	Масло АМГ-10 $\nu=8,759$ мм ² /с	44698	79140	110681	1,771
	Масло АМГ-10 $\nu=7,086$ мм ² /с	38229	56234	71595	1,471

Таким образом, устойчивость к деструкции полиметакрилатного загустителя повышается с приближением степени полидисперсности (PD) к 1, снижением изменения среднечисловой (M_n) и средневесовой молекулярной массы (M_w), а также снижением разницы между средневязкостной (M_v) и средневесовой (M_w) молекулярных масс. Для характеристики стабильности к механической деструкции масла при его применении в ГС АТ предложена математическая система, представляющая собой степень полидисперсности (PD), стремящуюся к 1, и отношение разности средневязкостной (M_v) и средневесовой (M_w) молекулярных масс к средневесовой молекулярной массе (M_w), стремящееся к минимуму:

$$\left\{ \begin{array}{l} (\frac{M_v - M_w}{M_w}) \rightarrow \min; \\ PD \rightarrow 1. \end{array} \right. \quad (7)$$

Исследованиями стабильности свойств масла АМГ-10 с разными загустителями в ф-модели установлено, что кинематическая вязкость при 50 °С для масла АМГ-10 снизилась до 7 мм²/с с присадкой Максойл ВЗ-011 после 50 ч испытаний, IRGAFLO 6000 V – после 40 ч, с Viscoplex 7-610 – через 27 ч продолжительности испытаний на стенде. Это свидетельствует о повышенной устойчивости к деструкции полиметакрилатной присадки Максойл ВЗ-011 в составе масла АМГ-10 по сравнению с Viscoplex 7-610 и IRGAFLO 6000 V.

В Главе 4 приведена технико-экономическая оценка результатов исследования стабильности свойств ГМ для АТ. Показано, что использование нового метода оценки стабильности свойств ГМ повышает информативность и достоверность принятия решений по срокам службы ГМ в ГС, сокращает время проведения стендовых испытаний до 50 % и снижает затраты до 20 %.

Предложено включить новый метод оценки стабильности свойств ГМ в перечень квалификационных испытаний масла АМГ-10 с целью подтверждения соответствия физико-химических показателей и ЭС масла требованиям и нормам ГОСТ 6794, а также использовать предложенный критерий, представляющий собой математическую систему, для выбора загущающей присадки в составе ГМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью прогнозирования срока применения масла до замены в ГС АТ в ходе диссертационных исследований решена актуальная научная задача, заключающаяся в разработке математической модели прогнозирования срока смены ГМ при применении в АТ на основе количественных зависимостей и закономерностей изменения показателей стабильности свойств, установленных путем физического и математического моделирования.

При этом получены следующие новые научные и практические результаты:

1. Обоснованы условия подобия ХП деградации свойств ГМ при его применении в ГС АТ, учитывающие параметры работы гидросистемы и ее конструктивные особенности, заключающиеся в равенстве значений критериев геометрического и гидродинамического подобия (критерии Re , Eu , Sh), полученных методом анализа размерностей, и условия однозначности процесса при соответствии значений давления, температуры и кинематической вязкости масла ($P, T, \nu^T = idem$) в ГС и ф-модели.

2. Разработан метод прогнозирования срока применения ГМ до его замены в ГС АТ, сущность которого заключается в получении математической модели изменения кинематической вязкости при 50 °С и кислотного числа масла от продолжительности испытаний на стенде в режиме максимальной нагрузки ($P=21$ МПа, $T=120$ °С), определении предельного времени эксплуатации ГМ в ГС по корреляционной зависимости между временем эксплуатации масла в ГС АТ (самолета Ил-76) и продолжительностью испытаний в ф-модели, при которой кинематическая вязкость масла при 50 °С достигает предельного значения, равного 7 мм²/с.

Установлены минимальные сроки применения масла АМГ-10 в ГС Ил-76 до его замены с различными полиметакрилатными присадками: с присадкой Максойл ВЗ-011 – 2210 ч, с IRGAFLO 6000 V – 1768 ч, с Viscoplex 7-610 – 1192 ч.

3. По результатам исследований влияния химической природы базового масла и загущающей присадки на стабильность свойств ГМ установлено, что образцы на основе изопарафиновых масел HVI-2 и VHVI-4, масле ПАО-2, загущенные полиметакрилатной присадкой с молекулярной массой 40000, обладают высоким уровнем стабильности свойств: индекс вязкости выше 300, температура застывания до минус 70 °С, стабильность вязкости к механической деструкции 20 %.

4. Получены прогнозные модели изменения кинематической вязкости при 50 °С и кислотного числа масла АМГ-10 при его применении в ГС АТ в рабочем диапазоне значений температуры (60-120 °С), давления (16-21 МПа) и продолжительности испытаний (30-40 ч) в виде полиномов второй степени, позволившие установить:

- кинематическая вязкость при 50 °С является показателем качества, наиболее склонным к снижению, изменения кислотного числа находятся в пределах сходимости метода определения;

- стабильность вязкости масла с загущающей полиметакрилатной присадкой с молекулярной массой 40000 (Максойл ВЗ-011) выше на 7 %, чем с молекулярной массой 45000 (Viscoplex 7-610).

5. Изучены процессы механической деструкции модификаторов вязкости в составе масла при его применении в ГС АТ:

- на устойчивость масла к механической деструкции влияют вязкостные характеристики основы масла и молекулярно-массовые характеристики модификатора вязкости;

- отечественная вязкостная полиметакрилатная присадка с молекулярной массой 40000 (Максойл ВЗ-011) в составе масла АМГ-10 на 30 % устойчивее к деструкции, чем зарубежная полиметакрилатная присадка с молекулярной массой 45000 (Viscoplex 7-610);

- применение полиметакрилатной присадки с молекулярной массой 40000 (Максойл ВЗ-011) в составе масла АМГ-10 позволяет увеличить срок смены в гидравлической системе самолета до 50 %;

- предложен критерий стабильности загущающей присадки в виде математической системы, включающей степень полидисперсности (PD), стремящуюся к 1, и отношение разности средневязкостной (M_v) и средневесовой (M_w) молекулярных масс к средневязкостной (M_v) молекулярной массе, стремящейся к минимуму.

6. Обоснована технико-экономическая эффективность разработанного метода прогнозирования стабильности свойств гидравлических масел с применением стенда: повышается информативность и достоверность результатов при квалификационной оценке гидравлических масел, сокращается время проведения стендовых испытаний до 50 %, снижаются затраты до 20 %.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Маньшев, Д. А. Методы определения стабильности свойств рабочих жидкостей в гидравлических системах / Д. А. Маньшев, Е. И. Сафронова // Инновационные научные исследования в современном мире: теория, методология, практика. Сборник статей по материалам I международной научно-практической конференции. – 2019. – № 1. – С. 147-153.

2. Митягин, В. А. Оценка стабильности рабочих жидкостей на гидравлическом стенде / В. А. Митягин, И. В. Поплавский, Е. М. Вижанков, Е. И. Сафронова // Труды Российского Государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2019. - № 3. – С. 165-173.

3. Маньшев, Д. А. Обоснование методического подхода к оценке стабильности эксплуатационных свойств гидравлических жидкостей при применении в военной авиационной технике / Д. А. Маньшев, Е. И. Сафронова // Евразийский союз ученых (ЕСУ). – 2020. – № 11 (80). – С. 40-47.

4. Митягин, В. А. Возможность программной оценки стабильности гидравлических жидкостей на стенде / / В. А. Митягин, И. В. Поплавский, Е. М. Вижанков, Е. И. Сафронова // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2020. – № 9. – С. 39-43.

5. Сафронова, Е. И. Новый методический подход к исследованию стабильности свойств масла АМГ-10 для гидравлических систем авиационной техники / Е. И. Сафронова, Д. А. Маньшев // Сборник статей по материалам национальной научно-практической конференции с международным участием «Нефть и газ: технологии и инновации»

Нефть и газ: технологии и инновации: материалы Национальной научно-практической конференции. В 3 томах. Том 2. – 2020. – 216 с.

6. Сафронова, Е. И. Оценка стабильности гидравлических жидкостей военной авиационной техники на стенде с помощью программного обеспечения / Е. И. Сафронова, Д. А. Маньшев // Технологии энергообеспечения. Сборник статей II Всероссийской научно-технической конференции. – 2020. – С. 411-420.

7. Маньшев, Д. А. Способ оценки стабильности эксплуатационных свойств гидравлических жидкостей для авиационной техники // Д. А. Маньшев, Е. И. Сафронова // Сборник трудов XIV Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России», Том 1 – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. – 2021. – С. 146-155.

8. Митягин, В. А. Программа оценки гидравлических жидкостей на стенде / В. А. Митягин, И. В. Поплавский, Е. И. Сафронова // Нефтегазовое дело. – 2021. - № 4. – С. 49–56.

9. Сафронова, Е. И. Исследование изменения кинематической вязкости масла АМГ-10 в условиях эксплуатации самолета Ил-76 / Е. И. Сафронова, Д. А. Маньшев // Сборник статей III научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Энергетика. Технологии, аппараты и машин жизнеобеспечения». – 2021. – С. 87–97.

10. Сафронова, Е. И. Прогнозная модель срока смены масла АМГ-10 при его применении в гидравлической системе самолета / Е. И. Сафронова, В. А. Митягин, Д. А. Маньшев, И. В. Поплавский // Нефтегазовое дело. – 2022. – № 4. – С. 136-153.

11. А. с. 2019667726 РФ. Программа для оценки стабильности свойств рабочих жидкостей для гидравлических систем / Митягин В.А., Поплавский И.В., Вижанков Е.М., Калинин А.Е., Цветков К.В., Сафронова Е.И. – № 2019664462; заявл. 14.11.2019; опубл. 26.12.2019.